

Marek Lenartowicz*, Jerzy Sablik**

ZIARNA HYDROFILOWE W PRZEMYSŁOWYM PROCESIE FLOTACJI WĘGLI O RÓŻNYM STOPNIU UWĘGLENIA

1. Wstęp

W wyniku zmechanizowania procesu urabiania węgla kamiennego i transportu urobku do zakładu przerobczego powstają duże ilości bardzo drobnych ziaren. Jedną z podstawowych metod wzbogacania tych ziaren jest flotacja. Proces flotacji wykorzystuje różnice we właściwościach powierzchniowych ziaren węglowych i ziaren mineralnych, a przede wszystkim różnice w hydrofobowości, której miarą może być graniczny kąt zwilżania i napięcie powierzchniowe zwilżania niskoenergetycznych ciał stałych. Wartość napięcia powierzchniowego zwilżania ciał stałych (węgla) można wyznaczyć opracowaną w latach 80. XX wieku przez Fuerstenaua i współpracowników [1, 2] metodą frakcjonowanej flotacji powierzchniowej (FFP). J. Sablik określił empiryczną zależność między granicznym kątem zwilżania powierzchni a napięciem powierzchniowym zwilżania węgla o różnym stopniu zmetamorfizowania [4] i z zależności tej wynika, że hydrofobowość powierzchni zanika całkowicie kiedy wartość napięcia powierzchniowego zwilżania zerowego granicznego kąta zwilżania $\gamma_{c(\theta=0)}$, wynosi $57,87 \text{ mJ/m}^2$. Wielkość tę, uznać można za ważną cechę charakterystyczną powierzchni ziaren węglowych. Ziarna węgla, których krytyczne napięcie powierzchniowe zwilżania jest większe od liczby $\gamma_{c(\theta=0)} = 57,87 \text{ mJ/m}^2$ są całkowicie hydrofilowe i nie wykazują aktywności flotacyjnej [5]. Udział ziaren hydrofilowych w danym zbiorze zależy od stopnia uwęglenia węgla, mierzonego zawartością w nim węgla pierwiastkowego (C^{daf}) i wraz ze wzrostem tego stopnia maleje [4, 5].

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki badania procentowego udziału ziaren hydrofilowych w zbiorze ziaren uzyskanych z brył węgla, nadaw oraz produktów wzbog-

* Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG, Gliwice

** Główny Instytut Górnictwa, Katowice

gacania maszyn flotacyjnych typu IZ-12 wzbogacających węgle o różnym stopniu uwęglenia. Analizowano z tego punktu widzenia również powstające w tym procesie odpady.

2. Metodyka badań

2.1. Charakterystyka badanych węgla

Do badań użyto próbek w postaci bryły węgla, zawiesin nadawy i produktów wzbogacania które pobrano w czasie pracy flotowników IZ-12. Próbki węgla w postaci brył pobierano w celach porównawczych i dobierano tak, aby nie zawierały przerostów i stanowiły skałę węglową o możliwie małej zawartości substancji mineralnej. Skróconą charakterystykę wzbogacanych węgla przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Charakterystyka węgla użytego do badań

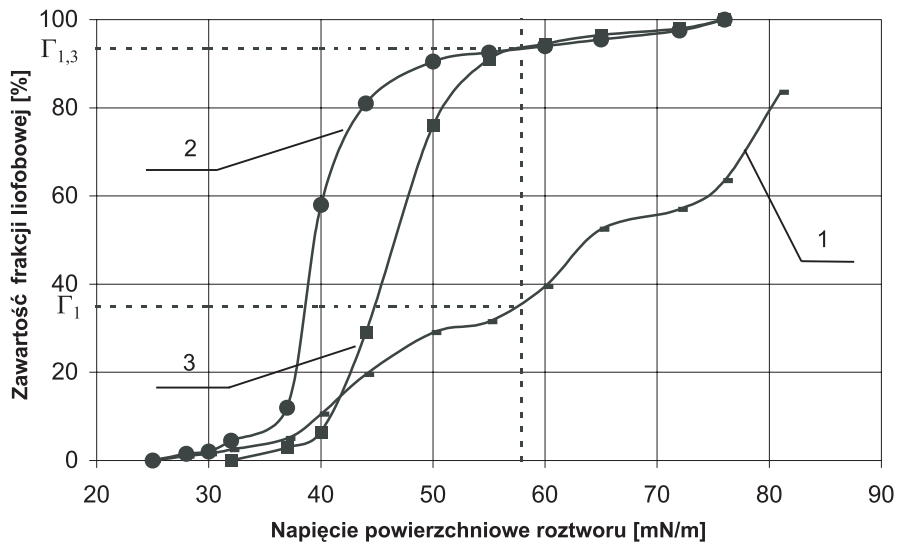
Rodzaj węgla	Typ węgla	Zawartość popiołu w bryle węgla, A^a , %	Zawartość węgla, C^{daf} , %	Zawartość popiołu w nadawie, %
Węgiel gazowo-płomienny	32.1	8,87	80,5	33,87
Węgiel gazowy	33	8,60	82,2	20,70
Węgiel gazowo-koksowy	34.2	4,63	85,1	28,26
Węgiel ortokoksowy	35.1	3,16	86,9	15,88

Przedmiot badań stanowił węgiel gazowo-płomienny typu 32.1 o zawartości popiołu 8,87%, gazowy typu 33 o zawartości popiołu 8,69%, gazowo-koksowy typu 34.2 o zawartości popiołu 4,63% i ortokoksowy o zawartości popiołu 3,16%. Muł węglowy stanowiący nadawę do maszyn flotacyjnych zawierał odpowiednio 33,87%; 20,70%; 28,26% i 15,88% popiołu.

2.2. Wyznaczenie udziału ziaren o powierzchniach hydrofilowych

Do wyznaczenia procentowego udziału ziaren hydrofilowych wykorzystano dystrybucje rozkładu napięcia powierzchniowego zwilżania ziaren uzyskane na podstawie wyników badań metodą frakcjonowanej flotacji powierzchniowej [1, 2] oraz wartość napięcia powierzchniowego zerowego kąta zwilżania $\gamma_{c(\theta=0)}$ [4]. Sposób przeprowadzania frakcjonowanej flotacji powierzchniowej (FFP, film flotation) został opisany w szeregu pracach [3, 8].

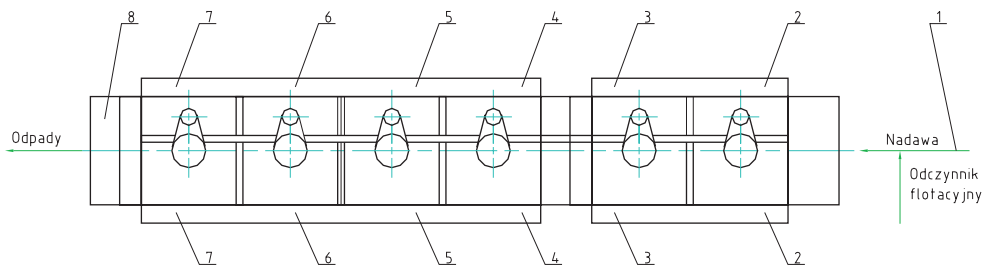
Udziały ziaren hydrofilowych wyznaczano graficznie poprzez zrzutowanie punktu przecięcia się odciętej $\gamma_{c(\theta=0)} = 57,87 \text{ mJ/m}^2$ z krzywą rozkładu napięcia powierzchniowego zwilżania na oś zawartości frakcji liofobowej [6]. Przykład wyznaczania zawartości takich ziaren pokazano na rysunku 1 (węgiel gazowo-płomienny typu 32.1 o $C^{daf} = 80,5\%$).



Rys. 1. Krzywe rozkładów napięcia powierzchniowego zwilżania węgla typu 32.1 w produktach uzyskanych w maszynie flotacyjnej IZ: 1 — nadawa, 2 — koncentrat I, 3 — bryła węgla, $(100 - \Gamma_n)$ — wychody ziaren hydrofilowych

2.3. Badania flotacji w skali przemysłowej

Etapem początkowym badań było opróbowanie pracujących w warunkach przemysłowych maszyn flotacyjnych IZ-12. Schemat maszyny z zaznaczeniem miejsc pobrania próbek przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat opróbowania flotownika IZ-12: 1 — Miejsce pobrania nadawy, 2 — Miejsce pobrania koncentratu I, 3 — Miejsce pobrania koncentratu II, 4 — Miejsce pobrania koncentratu III, 5 — Miejsce pobrania koncentratu IV, 6 — Miejsce pobrania koncentratu V, 7 — Miejsce pobrania koncentratu VI, 8 — Miejsce pobrania odpadów

Próbki nadawy pobierano bez odczynnika (1) natomiast próbki koncentratu pobierano dwustronnie z przestrzeni wirnikowych i łączono (2 do 7). Próbki odpadów pobierano z przelewu skrzynki odpadowej (8).

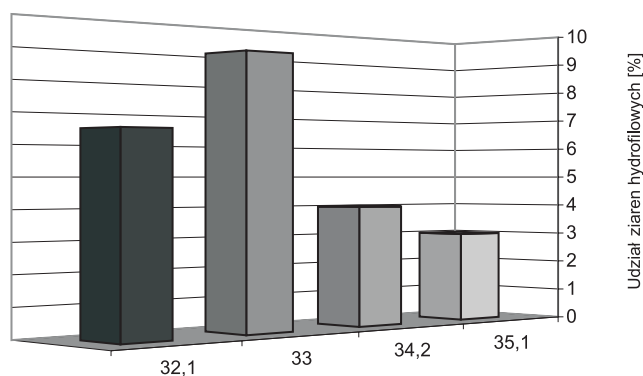
W wyniku opróbowania maszyn uzyskiwano jedną próbkę nadawy, sześć próbek koncentratu flotującego w kolejnych przestrzeniach wirnikowych wzbogacalnika (osiem próbek koncentratu w przypadku węgla typu 35.1 ponieważ maszyna flotacyjna była ośmiowirnikowa) oraz jedną próbkę odpadów.

3. Wyniki badań

3.1. Ziarna hydrofilowe w rozdrobnionych bryłach węgla

Na rysunku 3 przedstawiono udziały ziaren hydrofilowych w rozdrobnionych bryłach węgla typu 32.1; 33; 34.2 i 35.1.

W przypadku bryły węgla gazowo-płomiennego typu 32.1 zawierającego 8,87% popiołu, udział ziaren hydrofilowych wynosi około 6,5%.



Rys. 3. Udział ziaren hydrofilowych w rozdrobnionych bryłach węgla typu 32.1, 33, 34.2 i 35.1

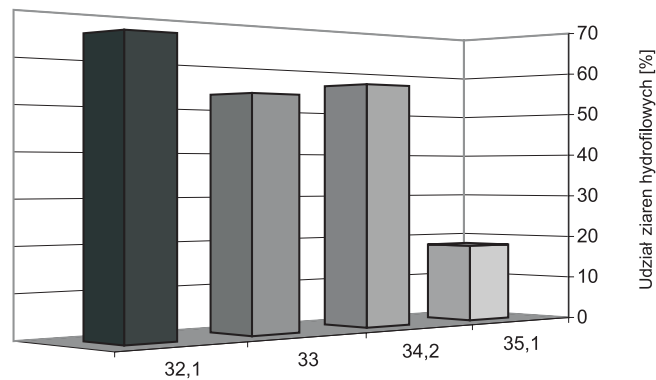
W przypadku ziaren uzyskanych z rozdrobnienia bryły węgla gazowego typu 33 zawierającego 8,60% popiołu, udział ziaren hydrofilowych wynosi około 9%, natomiast w przypadku bryły węgla gazowo-koksowego typu 34.2 zawierającego 4,63% popiołu, udział tych ziaren wynosi około 4%. Udział ziaren hydrofilowych w rozdrobnionej bryle węgla ortokoksowego typu 35.1 (3,16% popiołu) wynosi około 3%.

3.2. Ziarna hydrofilowe w nadawach do flotacji

Na rysunku 4 przedstawiono udziały ziaren hydrofilowych w nadawach węgla typu 32.1; 33; 34.2 i 35.1.

W przypadku nadawy węgla gazowo-płomiennego typu 32.1 zawierającej 33,87% popiołu, udział ziaren hydrofilowych wynosi około 65%.

Nadawa węgla gazowego typu 33 zawierała 20,70% popiołu, a udział w niej ziaren hydrofilowych wynosił około 53%, zaś nadawa węgla gazowo-koksowego typu 34.2 zawierała 28,26% popiołu, a udział tych ziaren wynosił około 56%. Udział ziaren hydrofilowych w nadawie węgla ortokoksowego typu 35.1 (15,88% popiołu) wynosi około 18%.

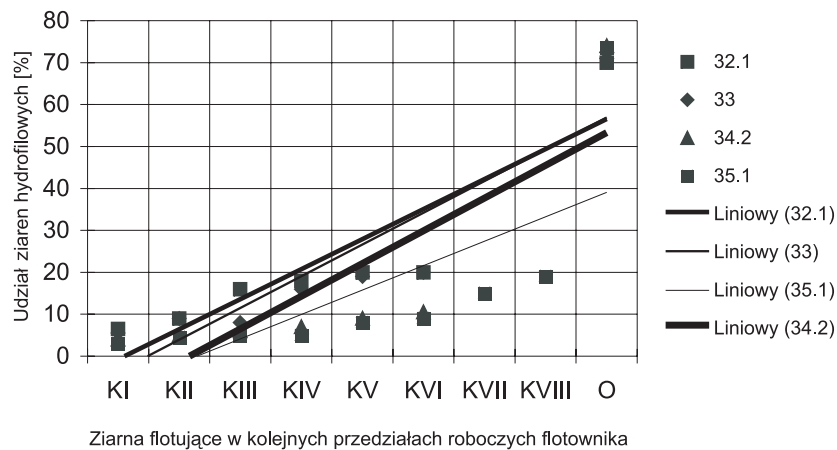


Rys. 4. Udział ziaren hydrofilowych w nadawach węgla typu 32.1; 33; 34.2 i 35.1

3.3. Ziarna hydrofilowe w produktach flotacji

Na rysunku 5 przedstawiono udziały ziaren hydrofilowych w produktach flotacji węgla typu 32.1; 33; 34.2 i 35.1.

W przypadku koncentratu I węgla typu 32.1 gdzie zawartość popiołu wynosi 8,55%, udział ziaren hydrofilowych wynosi ok. 6,5%.



Rys. 5. Udział ziaren hydrofilowych w produktach uzyskiwanych w kolejnych przedziałach roboczych maszyny flotacyjnej typu IZ-12

W koncentraty II, III, IV i V (zawartość popiołu odpowiednio 10,47%; 16,02%; 17,25% i 18,06%), udział ziaren hydrofilowych $\gamma_{c(\theta=0)} \geq 57,87 \text{ mJ/m}^2$ wynosi odpowiednio ok. 9%, ok. 16, ok. 18% i ok. 20%. Koncentrat VI i odpady zawierały odpowiednio 18,22% i 52,87% popiołu, a udział ziaren o napięciu powierzchniowym zwilżania powyżej $57,87 \text{ mJ/m}^2$ wynosił ok. 20% i ok. 70%.

Koncentraty I, II i III węgla typu 33 zawierały odpowiednio 8,30; 10,11 i 10,02% popiołu, a udział ziaren hydrofilowych wynosił odpowiednio ok. 5,5%, ok. 9% i ok. 8%. W koncentratkach IV i V (zawartość popiołu odpowiednio 14,26% i 14,95%) udział ziaren hydrofilowych $\gamma_{c(\theta=0)} \geq 57,87 \text{ mJ/m}^2$ wynosi ok. 16% i ok. 19%. Koncentrat VI i odpady zawierały odpowiednio 15,13% i 60,14% popiołu, a udział ziaren o napięciu powierzchniowym zwilżania powyżej $57,87 \text{ mJ/m}^2$ wynosił odpowiednio ok. 20% i ok. 71%.

W przypadku koncentratu I, II, III i IV węgla typu 34.2 gdzie zawartość popiołu wynosi odpowiednio 8,27%, 8,94%, 9,21% i 13,78%, udział ziaren hydrofilowych wynosi ok. 4%, ok. 5%, ok. 6% i ok. 7%. W koncentratkach V i VI (zawartość popiołu odpowiednio 14,53% i 15,70%), udział ziaren hydrofilowych $\gamma_{c(\theta=0)} \geq 57,87 \text{ mJ/m}^2$ wynosi ok. 9% i ok. 10,5%. W przypadku odpadów zawierających 66,31% popiołu, udział ziaren o napięciu powierzchniowym zwilżania powyżej $57,87 \text{ mJ/m}^2$ wynosi ok. 74%.

W koncentratkach I, II i III węgla typu 35.1 (gdzie zawartość popiołu wynosi odpowiednio 4,92%, 4,94% i 5,63%), udział ziaren hydrofilowych wynosi ok. 3%, ok. 4,5% i ok. 5%. W koncentratkach IV, V, VI, VII i VIII (zawartość popiołu odpowiednio 7,11%; 8,20%; 8,92%, 9,41% i 9,81%), udział ziaren hydrofilowych $\gamma_{c(\theta=0)} \geq 57,87 \text{ mJ/m}^2$ wynosi ok. 5%, ok. 8%, ok. 9%, i ok. 15% natomiast koncentrat VIII zawierał tych ziaren ok. 19%. Odpady zawierały 63,02% popiołu, a udział ziaren o napięciu powierzchniowym zwilżania powyżej $57,87 \text{ mJ/m}^2$ wynosił ok. 73,5%.

4. Dyskusja wyników badań

Badania obecności ziaren hydrofilowych, których powierzchnie mają napięcie powierzchniowe zwilżania ziaren γ_c równe lub większe od napięcia powierzchniowego zerowego kąta zwilżania $\gamma_{c(\theta=0)}$ ($57,87 \text{ mJ/m}^2$) [4] w zbiorze ziaren uzyskanych z rozdrobnienia brył węgla gazowo-płomiennego typu 32.1 i gazowego typu 33 oraz węgla gazowo-koksowego typu 34.2 i ortokoksowego typu 35.1 wykazały, że największa liczba ziaren hydrofilowych występuje w węglu gazowym typu 33, a najmniejsza w węglu ortokoksowym typu 35.1 (rys. 3). Liczba ziaren hydrofilowych w węglu zależy od stopnia uwęglenia węgla, im wyższy stopień zmetamorfizowania tym mniejsza liczba ziaren hydrofilowych w węglu. W przypadku ziaren uzyskanych z bryły węgla gazowego typu 33 liczba ziaren hydrofilowych jest większa niż w przypadku ziaren uzyskanych z bryły węgla gazowo-płomiennego typu 32.1. Prawdopodobną przyczyną tej różnicy może być fakt, że próbki węgla w postaci brył dobierano tak, aby nie zawierały przerostów i stanowiły skałę węglową o możliwie małej zawartości substancji mineralnej, a w pobranej próbie węgla typu 33 znalazła się większa zawartość substancji mineralnej.

Badania metodą frakcjonowanej flotacji powierzchniowej ziaren zawiesin węglowych stanowiących, nadawę do flotowników IZ-12, wykazały podobnie jak w przypadku rozdrobnionego węgla z brył, że liczba ziaren hydrofilowych zmniejsza się w miarę wzrostu stopnia uwęglenia węgla. Najmniejsza liczba ziaren hydrofilowych występuje w nadawie węgla ortokoksowego typu 35.1, a największa w nadawie węgla gazowo-płomiennego typu 32.1 (rys. 4).

W przypadku ziaren nadawy węgla gazowo-koksowego typu 34.2 badania metodą FFP wykazały, że liczba ziaren hydrofilowych jest większa niż w przypadku nadawy węgla gazowego typu 33. Różnicę tę można tłumaczyć większą zawartością popiołu (więcej ziaren hydrofilowych — popiołotwórczych) w mule węglowym stanowiącym nadawę do flotownika IZ-12, wzbogacającego węgiel typu 34.2 ($A^a = 28,26\%$) niż w mule węgla typu 33 ($A^a = 20,70\%$).

Wyniki badań obecności ziaren hydrofilowych w poszczególnych produktach wzbogacania wykazały, że najwięcej ziaren hydrofilowych przechodzi do koncentratu uzyskiwanego w pierwszych przedziałach wirnikowych w przypadku węgla gazowo-płomiennego typu 32.1 natomiast najmniej w przypadku węgla ortokoksowego typu 35.1, co można tłumaczyć wpływem substancji mineralnych rozmywalnych w wodzie na flotowalność mułów węglowych i który to wpływ zależy od stopnia zmetamorfizowania substancji węglowej [7]. Im niższy stopień uwęglenia węgla tym większa możliwość tworzenia się pokrycia mułowego na ziarnach odpadów, a co za tym idzie większy udział ziaren hydrofilowych w koncentracie (rys. 5).

W koncentraty uzyskiwanych w pierwszych przedziałach wirnikowych występuje niewielka liczba ziaren hydrofilowych (odpadowych) o napięciu powierzchniowym zwilżania większym lub równym od $57,87 \text{ mJ/m}^2$ prawdopodobnie na zasadzie wynoszenia mechanicznego ziaren mineralnych, wynoszenia zrostów oraz tworzenia się pokrycia mułowego na ziarnach odpadów lub zgarniane przez wygarniacze z pulpą flotacyjną. W koncentraty uzyskiwanych w dalszych przedziałach wzrasta liczba ziaren o powierzchniach hydrofilowych które przechodzą do nich na zasadzie wynoszenia mechanicznego i/lub są zgarniane z pulpą flotacyjną.

Analiza obecności ziaren hydrofilowych w odpadach uzyskanych z opróbowania maszyn flotacyjnych IZ-12 wykazała, że do odpadów węgla ortokoksowego typu 35.1 i gazowo-koksowego typu 34.2 przechodzi największa liczba ziaren hydrofilowych (73,5; 74%) natomiast do odpadów węgla gazowo-płomiennego typu 32.1 i gazowego typu 33 przechodzi mniej tych ziaren (70; 71%). Wyniki badań obecności ziaren hydrofilowych w odpadach wykazały, że węgle o większym stopniu uwęglenia (koksowe) charakteryzują się większą aktywnością flotacyjną niż węgle niżej uwęglone (energetyczne) między innymi dlatego większa liczba ziaren hydrofilowych przechodzi do odpadów węgla wyżej zmetamorfizowanych. Biorąc jednak pod uwagę zawartość popiołu w odpadach należy stwierdzić, że we wszystkich przypadkach węgla do odpadów przechodzi zbyt mała liczba ziaren hydrofilowych a zbyt duża liczba ziaren hydrofobowych o niskiej zawartości popiołu, co powoduje, że odpady charakteryzują się stosunkowo niską zawartością popiołu.

Analiza wyników badań obecności ziaren hydrofilowych w bryłach węgla, nadawie i produktach wzbogacania maszyn flotacyjnych IZ-12 pozwala stwierdzić, że liczba ziaren hydrofilowych w kolejnych produktach uzyskiwanych w flotownikach IZ rośnie i ziarna te przechodzą do produktów koncentratowych prawdopodobnie na zasadzie wynoszenia mechanicznego ziaren mineralnych, wynoszenia zrostów oraz tworzenia się pokrycia mułowego na ziarnach odpadów lub są zgarniane przez wygarniacze z pulpą flotacyjną. Ponadto większa liczba ziaren hydrofilowych przechodzi do produktów koncentratowych w przypadku węgla niżej zmetamorfizowanych niż w przypadku węgla wyżej uwęglonych.

5. Wnioski

- 1) Badania metodą frakcjonowanej flotacji powierzchniowej wykazały, że udział ziaren hydrofilowych w produktach uzyskiwanych wzdłuż maszyny flotacyjnej IZ jest coraz większy.
- 2) Ziarna hydrofilowe (odpadowe) o napięciu powierzchniowym zwilżania większym lub równym od $57,87 \text{ mJ/m}^2$ przechodzą do produktów koncentratowych prawdopodobnie na zasadzie wynoszenia mechanicznego ziaren mineralnych, wynoszenia zrostów oraz tworzenia się pokrycia mułowego na ziarnach odpadów lub zgarniane przez wygarniacze z pulpą flotacyjną.
- 3) Większa liczba ziaren hydrofilowych przechodzi do produktów koncentratowych w przypadku węgla typu 32.1 i 33 niż w przypadku węgla typu 34.2 i 35.1. Fakt ten można tłumaczyć wpływem stopnia zmetamorfizowania substancji węglowej. Im niższy stopień uwęglenia węgla tym większa możliwość tworzenia się pokrycia mułowego na ziarnach odpadów, a co za tym idzie większy udział ziaren hydrofilowych w koncentracie.
- 4) Do odpadów obok ziaren hydrofilowych przechodzą ziarna o powierzchniach hydrofobowych, co powoduje stosunkowo małą zawartość popiołu w tym produkcie; może to być powodowane niedostatecznym kontaktem tych ziaren z odczynnikiem zbierającym w procesie technologicznym we wzbogacalniku lub nieodpowiednim składem odczynnika flotacyjnego.
- 5) Frakcjonowana flotacja powierzchniowa może być wykorzystana do oceny technologii flotacji i sprawności technologicznej korytowej pneumomechanicznej maszyny flotacyjnej.

LITERATURA

- [1] *Diao L., Fuerstenau D.W.*: Characterisation of the wettability of solid particles by film flotation. Part II: Theoretical analysis. *Colloids and Surfaces*, 1991, 60, 145–160
- [2] *Fuerstenau D.W., Diao L., Williams M.C.*: Characterisation of the wettability of solid particles by film flotation, Part I: Experimental investigation. *Colloids and Surfaces*, 1991, 60, 127–144.
- [3] Sablik J.: Flotacja węgla kamiennych. Wyd. GIG 1998
- [4] *Sablik J.*: Zależność między granicznym kątem zwilżania a średnim krytycznym napięciem powierzchniowym zwilżania węgla o różnym stopniu zmetamorfizowania. *Inżynieria Mineralna*, 2003, nr 2(7).
- [5] *Sablik J.*: Wartości zerowe aktywności flotacyjnej i granicznego kąta zwilżania węgla w funkcji ich krytycznego napięcia powierzchniowego zwilżania. *Inżynieria Mineralna*, 2004, nr 1(12)
- [6] *Sablik J.*: Fizykochemiczne właściwości powierzchniowe węgla najdrobniej uziarnionych. *Przegląd Górniczy*, 2005, nr 9
- [7] *Sablik J.*: Flotowalność polskich węgla kamiennych jako funkcja stopnia ich uwęglenia. *Prace Głównego Instytutu Górnictwa*, 1980, Seria dodatkowa.
- [8] *Wierzchowski K.*: Praca doktorska. Katowice, GIG 1993